

親指と人差指の関節間角度の推定方法

辺 見 一 男*

Estimating the Joint Angles of the Thumb and Index Finger

Kazuo HEMMI

Abstract

A mathematical model which can estimate the various joint angles of the hand through simply finding the location of the fingertips and the direction they are pointing to. Applying the multiple regressions analysis method, it can be found that the angles are able to be determined as a linear function of the location of the fingertips and the directions. If one uses this model, even without directly measuring the coordinates of the hand's joints with the image processing, one may find them by calculating the joints from the coordinates and directions of the fingertips, and thus be able to recognize the form of the hand. Because direction and position of the fingertip can be rather easily detected by the image processing, it becomes possible to recognize the hand's form and movement in realtime through the hand's image. A model presented in this paper is only treat the motions that are carried out by two fingers, i.e. index finger and thumb.

1. まえがき

コンピュータを用いた手話や、マン・コンピュータ・インタフェースの分野では、手先の形状をコンピュータに認識させたいという要求が強い。手先の動作をリアルタイムで認識できれば、人間が日常生活で行っている動作をそのままコンピュータに入力させることが可能となり、極めて優秀なインタフェースを構築することができる。

たとえば、三次元CADのような用途を考えると、従来であれば入力装置としてはマウスやデジタイザなどのポインティングデバイスが広く用いられているが、これらは本来二次元平面上での動

きしか入力できないため三次元空間での操作には適していない。そこで、人間が日常生活で行っている、物をつかんで操作するという動作をそのままインタフェースとして用いることができれば極めて自然な感覚でコンピュータを操作することができる。このような用途では、人間の手先の動作を認識し、その動きを計算機のインタフェースとする方式が最も優れている。

手先の動作を入力とするインタフェースに関する研究は、メカニカルな手法を用いるものがほとんどである^{1)~5)}。この方式では装着に時間がかかったり、他の入力デバイスとの併用を考える場合に問題となるので、研究室やオフィスでの用途には向かない。このため、このような用途では、素

*情報科学センター助教授
1998年12月25日受付

手で操作を行うことができる画像処理を用いる方法が適している。人の動作を画像処理手法を用いて解析しようとする研究は、これまでに数多く行われているが^{6)~10)}、それをインタフェースに応用しようとする研究はあまり行われていない^{11)~15)}。

画像処理によって手先の動作を認識し、これをコンピュータのインタフェースとして用いる利点は多いが、このためにはリアルタイムで手先の動きを認識しなければならない。しかしながら、画像処理で手先の動作計測を行う場合、常にその処理速度が問題になる。通常の画像処理方法では、計算機内に構築した幾何モデルと実際に計測した画像情報とのパターンマッチングを行う方法¹⁶⁾を用いることが多いが、この方法は計算量が多く、リアルタイムで手先の形状を測定することは困難である。

画像処理によって手先の全関節座標をリアルタイムで求めるのは困難にしても、指先の座標や傾き角度であれば、リアルタイムで検出することは比較的容易である。そこで、本研究では、指先の方向ベクトルのように、ある特定の特徴量を画像処理によってリアルタイムで計測し、関節座標は指先ベクトルからモデルによって計算する方法を提案してきた¹⁷⁾。この方法であれば、関節座標の計算はモデルによってほぼ瞬時に計算できるため、手先の形状をリアルタイムで測定することが可能になる。

本稿では、特徴量として指先の座標と指先間の挟角を用い、この2つの特徴量から関節間の角度を求めることができるモデルの構築方法について述べる。関節間の角度が求まれば、関節座標は計算で求めることができるので手先の形状を定めることができる。本稿で扱う動作は、簡単化のため、親指と人差指の2指のみで行う動作に限定したが、他の指についても同様の手法で扱うことができる。

モデルは指先の座標と、指先が作り出す挟角を説明変数とし、関節間の角度を目的変数とする重回帰式によって構成することができた。

2. 実験システム

本稿では、親指と人差指の2指が様々な動作を行ったとき、このときの2指の関節座標と指先座標を計測し、指先と関節との間にどのような関係があるかを実験的手法によって明らかにした。このためには、2指によって様々な把握動作を行ったとき、2指の指先座標と2指の全関節の3次元座標のデータが必要となる。

データの測定は3台のビデオカメラの画像より3次元座標を導出する方法を用いた。この方法では、メカニカルな付加物は一切装着しないので手先の動作を拘束することなく、自然な動作を測定することができる。ビデオカメラはFig. 1に示すように前方、上方、右方の3方向に互いに直交するように配置した。3台のカメラの視野内で手先を動かし、このときの映像を3台同時に記録した。

3次元座標を計算するためには、3台のカメラの画像の同期をとる必要がある。このため、3台のシンクロナスカウンタを用意し、ビデオカメラには手先の画像と同時にシンクロナスカウンタの画像も記録できるよう配置した。3台のシンクロナスカウンタは、実験開始の合図と共に、同時にカウントを開始し、実験が終了するまで正確にカウントを行う。記録終了後、このカウンタの数値

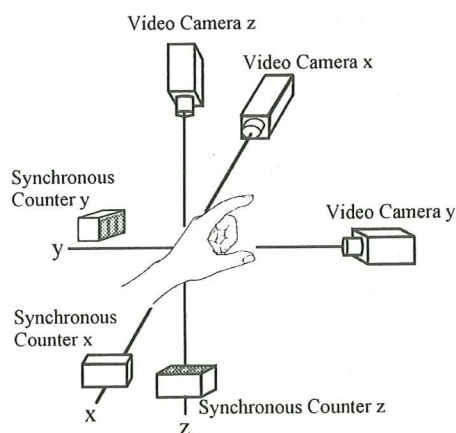


Fig. 1 The testing system.

を読みとることによって3方向からの画像の同期をとった。

3. 実験方法

被験者にはTVカメラの視野内で自由に手を動かすように指示し、この時の画像を記録した。記録時間は約2分間であり、この間に手先の様々な動作が含まれるように注意した。実験終了後、3方向の画像をビデオデッキで再生しながら1フレーム/秒のサンプリングレートで画像をパーソナルコンピュータに取り込み、ファイルとして保存した。

3台のビデオカメラの画像には、同期をとってあるシンクロナスカウンタの画像も記録されているので、このカウンタの数値を参照しながらパーソナルコンピュータに送る画像を選定した。この

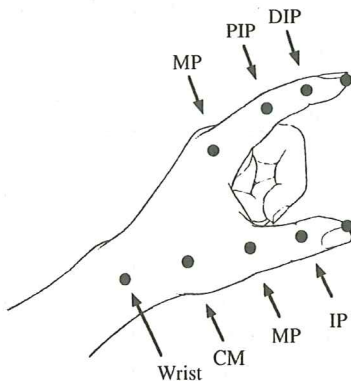


Fig. 2 Points marked for measurement.

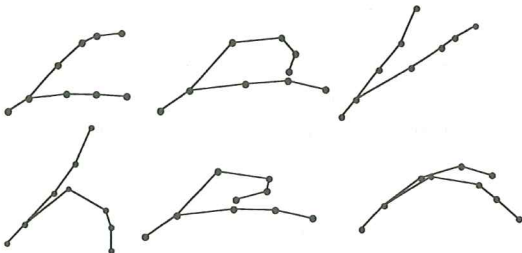


Fig. 3 Examples of experimental result

方法によって、XYZ方向の3枚の画像の同期をとることができる。

今回提案するモデルから算出される座標は、Fig. 2で黒丸で示されている7点(DIP, PIP, IP, MP, CM, 手首関節)である。さらに、モデルへの入力として親指と人差指の指先座標を用いるので、合計9点の座標を採取する必要がある。これらの座標は、パーソナルコンピュータに保存した画像ファイルを読み出しながら、手作業でサンプリングを行った。これら、指先の形状を特徴づける点を特徴点と呼ぶ。今回は50フレーム分の特徴点を用いて数式モデルの係数を決定した。

4. 実験結果

実験結果の例をFig. 3に示す。図中の黒点は特徴点を表している。2指で行う様々な動作が含まれているのがわかる。このとき、特徴点の座標 J_i ($i=0, \dots, 8$)と特徴点間の角度 θ_i ($i=1, \dots, 11$)をFig. 4のように定義した。 $J_1-J_2-J_3-J_4$ の接続は左手の人差指を、 $J_0-J_1-J_6-J_5$ の接続は左手の親指を表す。 J_0, J_1 は人差指と親指の指先を J_8 は手首の

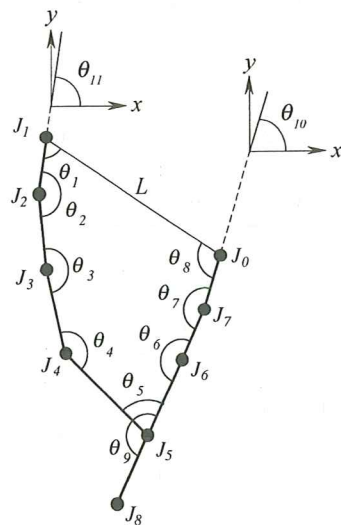


Fig. 4 The parameters of the finger characteristics.

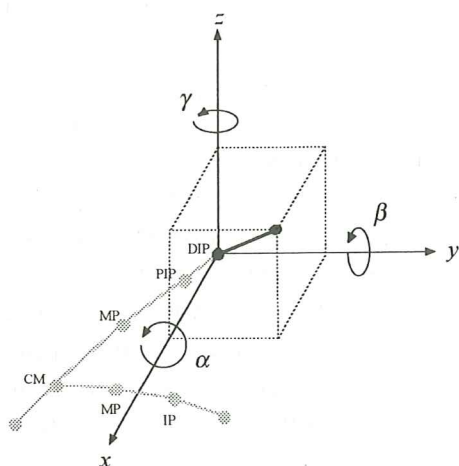


Fig. 5 Expression of the finger in three-dimensional space.

関節を表している。

5. 関節角導出モデル

本論文では親指と人差指の動作のみを扱う。モデルを作成するのに必要な3次元のパラメータをFig. 5のように定義する。手先の特徴点 J_i ($i=0, \dots, 8$) の3次元空間でのXYZ座標を (x_i, y_i, z_i) とする。特徴点間の角度 θ_i ($i=1, \dots, 11$) についてはX軸を中心に回転する角度を α_i , Y軸を中心に回転する角度を β_i , Z軸を中心に回転する角度を γ_i と表す。

親指と人差指の挟角をXY平面に投影した成分を ϕ_{xy} , YZ平面に投影した成分を ϕ_{yz} とすると, ϕ_{xy} は(1)式, ϕ_{yz} は(2)式で表せる。すなわち, ϕ_{xy} が挟角の水平成分を, ϕ_{yz} が挟角の垂直成分を表す。

手先の関節間の角度 θ_i ($i=1, \dots, 9$) はそれぞれ, XY平面, YZ平面, ZX平面へ投影した角度 $\gamma_i, \alpha_i, \beta_i$ ($i=1, \dots, 9$) に分けられるが, 各関節の3次元座標は γ_i, α_i ($i=1, \dots, 9$) が求まれば計算できる。同様に, 2指の挟角についてもXY平面,

Table 1 Results estimated of XY plane with the law of multiple regressions.

i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	g_i	h_i	j_i
2	236.52	-0.14	-0.29	-0.05	-0.03	0.16	-0.01	-0.18	-0.09
3	241.23	-0.46	-0.20	-0.22	-0.08	0.01	0.08	-0.06	-0.11
4	46.05	0.08	0.21	0.02	0.05	-0.07	-0.17	0.37	0.09
5	43.65	0.01	0.05	0.12	-0.09	-0.09	-0.01	0.06	-0.06
6	183.22	-0.13	0.03	0.16	-0.04	0.01	0.01	-0.10	0.04
7	155.71	-0.41	0.21	-0.02	0.30	-0.05	0.10	-0.11	0.11
9	173.63	0.12	0.01	0.11	-0.07	0.03	-0.01	0.11	-0.05

Table 2 Results estimated of YZ plane with the law of multiple regressions.

i	ℓ_i	m_i	n_i	o_i	p_i	q_i	r_i	s_i	t_i
2	239.76	0.24	-0.67	0.20	-0.01	0.42	-0.24	-0.28	-0.09
3	123.83	-0.37	-0.19	-0.13	-0.05	0.02	0.19	0.25	-0.20
4	100.45	-0.04	0.18	-0.06	-0.04	-0.09	0.09	0.22	0.31
5	35.60	0.01	-0.05	-0.11	-0.05	0.16	0.04	-0.04	0.08
6	157.51	-0.26	0.23	-0.03	0.07	-0.01	0.04	-0.05	0.03
7	142.58	0.00	0.02	0.12	0.02	0.22	-0.04	0.05	0.00
9	188.67	-0.12	0.07	-0.09	-0.01	-0.05	0.01	-0.02	-0.07

YZ平面, ZX平面に投影した角度 ϕ_{xy} , ϕ_{yz} , ϕ_{zx} が考えられるが, ϕ_{xy} , ϕ_{yz} が求まれば十分である.

$$\phi_{xy} = \gamma_{11} - \gamma_{10} \quad (1)$$

$$\phi_{xz} = \alpha_{11} - \alpha_{10} \quad (2)$$

関節間の角度 θ_i ($i=0, \dots, 8$) は ϕ_{xy} , ϕ_{yz} , x_0 , y_0 , z_0 , x_1 , y_1 , z_1 の関数で表せるものと仮定し, θ_i の Z 軸回転角 γ_i の推定値 $\hat{\gamma}_i$ を(3)式, X 軸回転角 α_i の推定値 $\hat{\alpha}_i$ を(4)式で定義する.

$$\hat{\gamma}_i = a_i + b_i \cdot \phi_{xy} + c_i \cdot \phi_{yz} + d_i \cdot x_0 + e_i \cdot y_0 + f_i \cdot z_0 + g_i \cdot x_1 + h_i \cdot y_1 + j_i \cdot z_1 \quad (3)$$

$$\hat{\alpha}_i = \ell_i + m_i \cdot \phi_{xy} + n_i \cdot \phi_{yz} + o_i \cdot x_0 + p_i \cdot y_0 + q_i \cdot z_0 + r_i \cdot x_1 + s_i \cdot y_1 + t_i \cdot z_1 \quad (4)$$

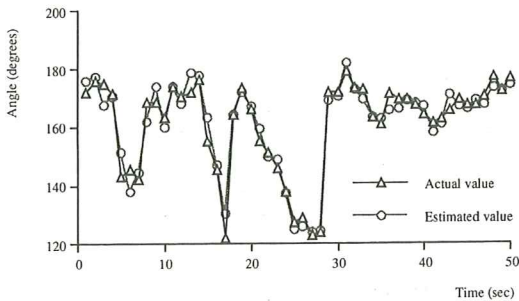
このとき目的変数を $\hat{\gamma}_i$, $\hat{\alpha}_i$, 説明変数を ϕ_{xy} , ϕ_{yz} , x_0 , y_0 , z_0 , x_1 , y_1 , z_1 とし, 重回帰分析により回帰係数 $a_i \sim j_i$ ($i=2, \dots, 7, 9$), $\ell_i \sim t_i$ ($i=2, \dots, 7, 9$) を求めた結果を Table 1, Table 2 に示す. (1)式から(4)式を関節角導出モデルと呼ぶ. このモデルによって, 手先の関節間角度を求めることができる. 関節間角度が求まれば手先の関節座

標は計算でき, 手先の形状を定めることができる.

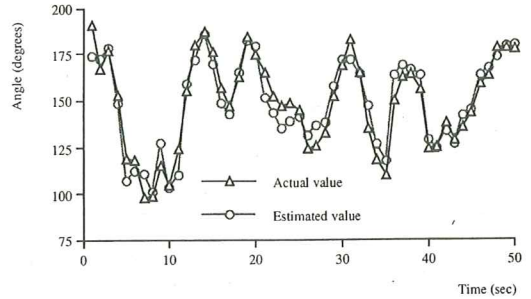
6. 関節角導出モデルの評価

先に定義した関節角導出モデルの妥当性を検証するためにシミュレーションを行い実測値との比較を行った. シミュレーションは, ϕ_{xy} , ϕ_{yz} , x_0 , y_0 , z_0 , x_1 , y_1 , z_1 を(3)式, (4)式に代入して推定値を求めた. γ_i の推定値を $\hat{\gamma}_i$, α_i の推定値を $\hat{\alpha}_i$ とする. Fig. 6 には γ_i と $\hat{\gamma}_i$ のうち, $i=2, \dots, 5$ についてのみ示した. ここに示した角度は関節角度の水平成分であるが, かなり良い近似結果が得られていることがわかる. Fig. 7 には α_i と $\hat{\alpha}_i$ のうち, $i=2, \dots, 5$ について示のみした. ここに示した角度は関節角度の垂直成分であるが, かなり実測値に追従はできているが, 所々実測値に追従できない部分があり, 水平成分に比べると精度が落ちる.

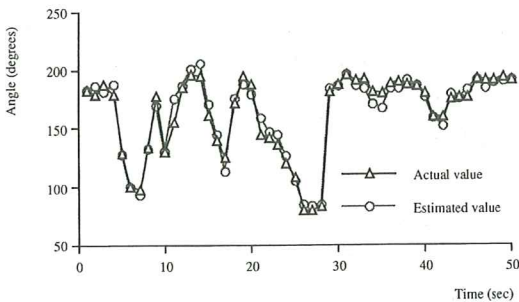
このときの誤差の平均値を Table 3, Table 4 に示す. Table 3 には γ_i と $\hat{\gamma}_i$ の間の平均誤差を



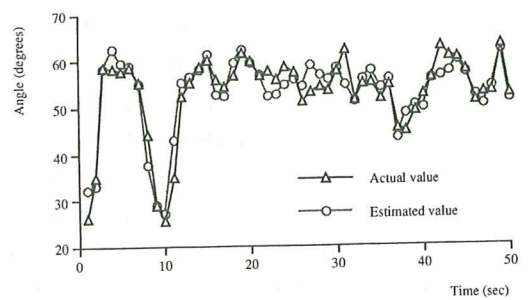
(a) γ_2



(c) γ_4



(b) γ_3



(d) γ_5

Fig. 6 Examples of simulation results in XY plane.

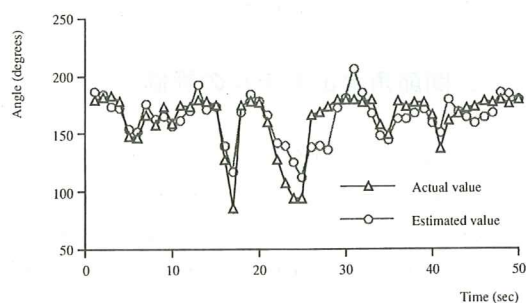
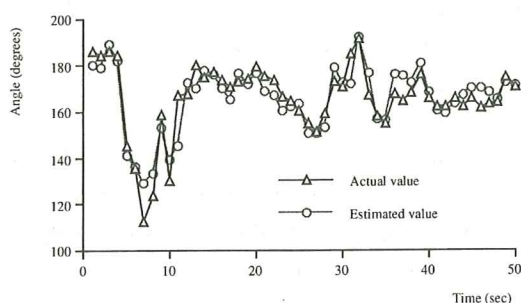
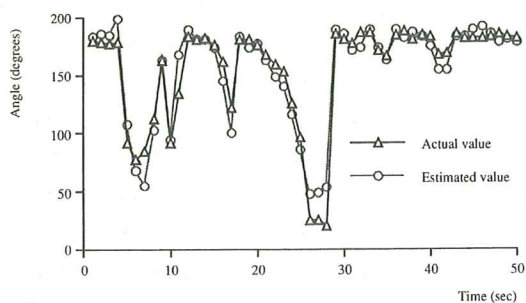
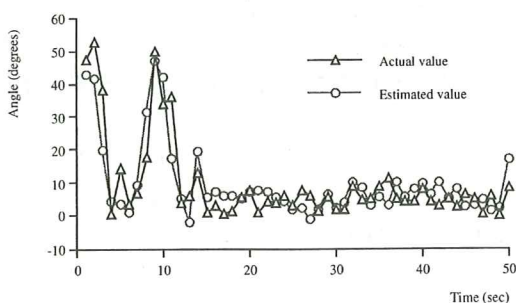
(a) α_2 (c) α_4 (b) α_3 (d) α_5

Fig. 7 Examples of simulation results in YZ plane.

Table 3 The mean value of the absolute errors in XY plane.

γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	γ_6	γ_7	γ_9
2.87	5.12	6.28	2.32	4.91	5.89	3.08

示した。同様に、Table 4 には α_i と $\bar{\alpha}_i$ の間の平均誤差を示した。人体の動作解析の分野では、5 度程度の誤差であれば十分に実用になると言われているので、水平成分については最大値が 6.28 度で、5 度よりは大きいものの、動作解析には利用できるのではないかとと思われる。垂直成分については最大値が 11.33 度となっており、誤差が大きすぎるので動作解析に利用するには無理がありそうである。説明変数の調整などを行い、さらに誤差を減少させる必要がある。マン・コンピュータ・インターフェースの分野への応用を考えると、モデルから推定した手の形状が実際の形状と大きく異なる限り問題とならないので、今回提案したモデルでもこの分野では有効になるとと思われる。

Table 4 The mean value of the absolute errors in YZ plane.

α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_9
11.33	9.02	5.12	4.72	6.12	6.95	4.76

7. むすび

本稿では、親指と人差指の様々な動作を非接触で計測し、このときの動作を水平面内の動作成分と、垂直面内の動作成分に分離して解析を行った。その結果、指の関節間の角度は、指先の座標と指先の挟角を変数とする線形関数で表せることを明らかにできた。このとき、関節間の角度を目的変数、指先の座標と挟角を説明変数として重回帰分析を行い、それぞれの係数を決定した。水平面内の動作成分については平均誤差の最大値は 6.28 度で実用上十分な精度を有しているといえるが、垂直面内の動作成分では平均誤差の最大値が 11.33

度であり、かなり誤差が大きかった。垂直面内の動作成分を表す関節角導出モデルについては、説明変数の調整などによって改善していく必要がある。

今回は、親指と人差指の関節角度の推定方法について述べたが、他の指についてもここで提案した手法によって、関節角度の推定を行うことができるので、今後は手先全体の関節角度を推定できるモデル式の提案を行っていきたい。

＜参考文献＞

- 1) 山口淳史, 尾口裕介, 田口英郎: "光ファイバセンシングによる指関節動作の計測", 第34回システム制御情報学会研究発表講演会 3024 (1990)
- 2) 佐藤理, 木内義之, 川村貞夫: "手及び手首の動作計測システムの試作と作業戦略の解析", 第33回システム制御情報学会研究発表講演会 3047 (1989)
- 3) 佐藤誠, 平田幸広, 河原田弘: "空間インタフェース装置 SPIDAR の提案", 信学論 (D-II), J74-D-II, 7, pp.887-894 (1991-07).
- 4) 野間春生, 岩田洋夫: "9 自由度フォースディスプレイの開発とその操作性評価", 計測自動制御学会論文集, 29, 4, pp.455-460 (1993).
- 5) 水口武尚, 平田幸広, 佐藤誠, 河原田弘: "仮想積木の世界", 信学技報, HC91-2 (1991).
- 6) 鳥毛明, 河野哲也: "画像処理を用いた手招き動作のリアルタイム認識", 計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.9, pp.1064-1069 (1993)
- 7) 石井浩史, 望月研二, 岸野文郎: "人物像合成のためのステレオ画像からの動作認識法", 電子情報通信学会論文誌D-II, J76-D-II, No.8, pp.1805-1812 (1993)
- 8) Joseph O'rourke and Norman I.Badler: "Model-based image analysis of human motion using constraint propagation", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vo.PAMI-2, No.6, pp.522-536 (1980)
- 9) Gunnar Johansson: "Visual perception of biological motion and a model for its analysis", IEEE Trans. Perception & Psychophysics, Vo.14, No.2, pp.201-211 (1973)
- 10) Lynn T. Kozlowski and James E. Cutting: "Recognizing the sex of a walker from a dynamic point-light display", IEEE Trans. Perception & Psychophysics, Vo.21, No.6, pp.575-580 (1977)
- 11) 辺見一男, 井上和夫: "ディスプレイ上の像を把持できる3次元インターフェース——マーカー追跡による方法——", 電子情報通信学会論文誌D-II, J74-D-II, No.9, pp.1264-1272 (1991)
- 12) 今川和幸, 呂山, 猪木誠二, 松尾英明: "肌色領域により隠れて見える場合を考慮した手話画像からの手の実時間追跡", 電子情報通信学会論文誌D-II, J81-D-II, No.8, pp.1787-1795 (1998)
- 13) 西村拓一, 向井理郎, 岡隆一: "白黒動画像からの形状特徴を用いたジェスチャのスポッティング認識システム", 電子情報通信学会論文誌D-II, J81-D-II, No.8, pp.1812-1821 (1998)
- 14) 西村拓一, 向井理郎, 野崎俊輔, 岡隆一: "動作者適応のためのオンライン教示可能なジェスチャのスポッティング認識システム", 電子情報通信学会論文誌D-II, J81-D-II, No.8, pp.2822-1830 (1998)
- 15) 畠直志, 岩井儀雄, 谷内田正彦: "動き情報と情報圧縮を用いたロバストなジェスチャ認識手法", 電子情報通信学会論文誌D-II, J81-D-II, No.9, pp.1983-1992 (1998)
- 16) 藤井範久, 森脇俊道: "画像処理を用いた指の動作計測に関する研究", 人間工学 Vol.27, No.3, pp.151-157 (1991)
- 17) 李亜兵, 辺見一男, 森隆知, 井上和夫: "2指の動作モデルの構築", 電子情報通信学会論文誌D-II, J77-D-II, No.5, pp.1031-1034 (1994)